

Artículo/Article
Sección B/Section B
Vol. 16, nro. 2
e3277

Maíces con alto contenido de antocianina, biofortificados con zinc, provitamina A y de alta calidad de proteína en Perú

Luis A. Narro León[1], Alexander Chávez Cabrera[2*], Peter C. Piña Díaz[2], Fernando Escobal Valencia[2], Alicia E. Medina Hoyos[2], Teodoro P. Narro León[2], Roberto Alvarado Rodríguez[2], Kryss A. Vargas Gutiérrez[2], Fabian C. Velásquez Leveaú[2], Mercedes Escalante Vega[1], Gilberto A. García Pando[1], Pedro Carrillo Zavala[1], Raihil Rengifo Sánchez[1], Elizabeth Ricse Belen[1], Demetrio Flores Mendoza[3], Willian M. Huamanchay Rodriguez[3], Ronal Otiniano Villanueva[3]

[1] Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

[2] Instituto Nacional de Innovación Agraria, Lima, Perú

[3] Asociación Pataz, La Libertad, Perú

[*] Autor para Correspondencia / Corresponding Author, e-mail: achavezcab@yahoo.com

Maize with high anthocyanin, biofortified with zinc, provitamin A, and quality protein in Perú

Abstract

"Hidden hunger" is a serious problem affecting over 2000 million people in developing countries. In Peru, it has increased from 17.7 to 19.6, between 2021 and 2022. This problem is caused by deficiencies in micronutrients and vitamins in humans. Crop biofortification for zinc (Zn), iron (Fe), and provitamin A (ProA) has emerged as an initiative to help solve this problem using conventional breeding (no transgenics). Research in Peru shows the feasibility of promoting biofortified maize with high Zn, high ProA and also high grain yield potential. For purple maize, which contains anthocyanins, a chemical with beneficial effects for humans, studies on varietal adaptation and anthocyanins content are being conducted in Peru. Preliminary results show clear differences among varieties for grain yield potential and high anthocyanin content in the cob, husk, and grain. Purple maize production has increased fourfold in the last twenty years due to increased local consumption and exports. However, its contribution to Gross Domestic Product (GDP) is minimal, less than 1 %. Consequently, this presents a big challenge and an opportunity for research and technology development to increase maize production and link purple maize producers with global consumers. For quality protein maize, available hybrids with high grain yield potential and wide adaptation must be promoted in Peru.

Keywords: Purple maize, malnutrition, biofortification, protein quality

Resumen

Más de 2000 millones de personas en el mundo padecen "hambre oculta" por insuficiencia de minerales y/o vitaminas en la dieta diaria. La situación del hambre en Perú pasó de 17.7 a 19.6 puntos de 2021 a 2022. La biofortificación de cultivos surgió como una iniciativa para ayudar a solucionar este problema mediante la producción de plantas con mayor contenido de zinc (Zn), hierro (Fe) y provitamina A (ProA) en el grano utilizando métodos de mejoramiento convencional (no transgénicos). Los resultados obtenidos en el Perú nos





Editado por / Edited by: María Gabriela Albán

Recibido / Received: 01/03/2024

Aceptado / Accepted: 29/05/2024

Publicado en línea / Published online: 24/06/2024

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



muestran que existen híbridos de maíz biofortificado, con alto contenido de Zn y ProA, y con muy buen potencial de rendimiento. Para el caso del maíz morado, con alto contenido de antocianinas, un fitoquímico que tiene efectos beneficiosos para la salud de las personas, se está estudiando la adaptación de las variedades en todo el país tanto para el rendimiento del grano como para el contenido de antocianinas. Resultados preliminares indican que hay claras diferencias entre variedades para rendimiento y contenido de antocianina en la coronta, brácteas y grano. La producción de maíz morado se ha cuadruplicado en los últimos 20 años por un mayor consumo interno y por el incremento en las exportaciones. Sin embargo, su contribución al Producto Bruto Interno (PBI) es muy baja: menor al 1 %; lo que es un reto y una oportunidad para desarrollar y transferir tecnología que incremente la producción y vincule al productor de maíz morado con el consumidor. En el caso de maíz de alta calidad de proteína (QPM), se ha liberado en el Perú un híbrido simple (QPM) de color amarillo intenso, con alto potencial de rendimiento y amplia adaptación.

Palabras clave: Maíz morado, desnutrición, biofortificación, calidad de proteína

INTRODUCCIÓN

Más de 2000 millones de personas en el mundo padecen "hambre oculta" debido a la insuficiencia de micronutrientes y/o vitaminas en la dieta diaria y alto consumo de carbohidratos [1,2,3]. Por otro lado, una cantidad similar de personas tiene sobrepeso y obesidad [4]. Ambos problemas son caras de una misma moneda, consecuencia de malos hábitos alimenticios [5,6]. Para encarar este problema, los gobiernos de diversos países han implementado programas de suplementación y fortificación de alimentos que muchas veces no llegan a los pobladores del ámbito rural [2,7]. La biofortificación en base a la gran diversidad de plantas existente es una alternativa complementaria, viable y eficiente, orientada al desarrollo de micronutrientes y vitaminas en cultivos básicos como arroz, camote, maíz, trigo, yuca, entre otros, utilizando principalmente el mejoramiento convencional (sin incluir organismos genéticamente modificados) y el manejo agronómico [2,3,7,8,9,10,11,12,13]. Es decir, la propia planta produce los micronutrientes y vitaminas que la persona necesita y el manejo es similar al de los cultivos no biofortificados.

Existen 149 millones de niños menores de cinco años que sufren retraso en el crecimiento, y alrededor de 50 millones de emaciación (adelgazamiento patológico). Por otro lado, hay sectores de la población donde hay un aumento rápido de tasas de sobrepeso [4,13,14,15]. La FAO [13] informa que entre 691 y 783 millones de personas padecieron hambre en 2022. En 2023, casi 282 millones de personas en 59 países experimentaron altos niveles de hambre aguda, es decir, 24 millones más que en 2022 [16]. La situación del hambre en Perú se ha incrementado de 17.7 puntos en 2021 a 19.6 puntos en 2022, según los últimos resultados del Índice Global del Hambre (IGH) 2023. Esta es la posición más negativa en los últimos 10 años [17].

En Perú, 41.6 % de la población consume alimentos deficientes en Zn, lo que motiva retrasos en el crecimiento, susceptibilidad a enfermedades virales, diarrea y neumonía; principalmente en niños. Los maíces normales (no biofortificados) tienen alrededor de 22 ppm, mientras que los biofortificados más de 34 ppm de Zn.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



La deficiencia de vitamina A afecta al 12 % de niños menores de cinco años en el Perú. Esta deficiencia debilita el sistema inmunológico, causa xeroftalmia de la córnea e incluso ceguera completa. El consumo de maíz con ProA se puede dar como consumo directo o como alimento funcional; por ejemplo, gallinas alimentadas con maíz con alto contenido de ProA producen huevos con yemas con mayor contenido de este nutriente. Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los maíces normales [8,9].

La falta de proteínas durante la niñez puede afectar el desarrollo cognitivo, la reducción del apetito y la enfermedad de *kwashiorkor*. Las proteínas están constituidas por aminoácidos, pero la mayoría de los alimentos no disponen de todos los aminoácidos esenciales en suficiente cantidad. La lisina y el triptófano, por ejemplo, son dos aminoácidos esenciales deficitarios en el grano de maíz normal (no QPM), por lo tanto, las personas que consumen maíz normal en su dieta diaria pueden padecer los síntomas mencionados. Por otro lado, estos dos aminoácidos son importantes para curar la enfermedad de pelagra [18].

Las antocianinas cumplen funciones importantes en las plantas, desde dar protección de la radiación ultravioleta, la atracción de insectos y aves polinizadores, hasta impedir la congelación de las frutas, como las uvas. Estos fitoquímicos, presentes en el maíz morado, tienen efectos benéficos, tales como su capacidad antioxidante o de neutralización de radicales libres y actúan como antimutagénicos [19,20,21]. En el organismo humano, los factores vitamínicos del maíz morado son utilizados como protectores capilares y venosos [22,23] que previenen problemas de ateroesclerosis [24]. Además, ayudan a prevenir enfermedades cardiovasculares, ya que estimulan la circulación de la sangre y protegen los vasos sanguíneos de un posible deterioro oxidativo (ayudan a prevenir el envejecimiento prematuro).

En este entendido, el Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) y la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), en coordinación con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), están realizando la evaluación de maíces biofortificados con alto contenido de Zn, ProA, QPM, y maíces morados con alta calidad y cantidad de antocianinas. El objetivo de este documento es presentar los resultados preliminares obtenidos hasta la fecha en estos cuatro temas.

MAÍZ MORADO CON ALTO CONTENIDO DE ANTOCIANINAS

Entre 2010 y 2020, el principal destino de las exportaciones de maíz morado ha sido Estados Unidos con 50 % del total de exportaciones, seguido por la Unión Europea con alrededor del 20 %. La exportación a Ecuador tuvo un ritmo ascendente pasando de 9.1 % en 2010 a 17.1 % en 2020 (Tabla 1). El precio de exportación de grano de maíz morado en los últimos años ha oscilado entre 2.0 y 2.5 USD/kg para Estados Unidos y España. Para América Latina, como en el caso de Chile, el precio ha bordeado los 0.5 USD/kg.

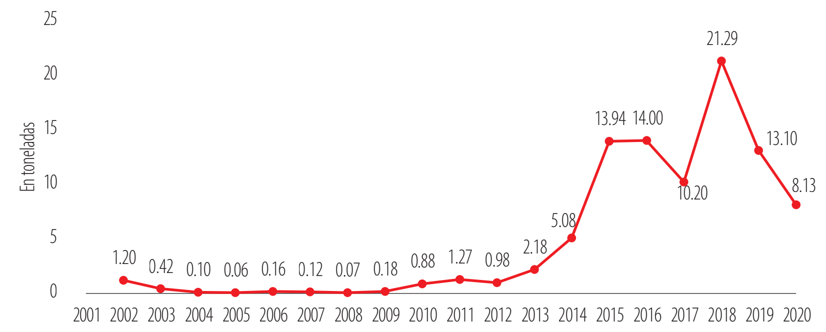
Además de maíz morado se están exportando antocianinas. Durante el año 2002, se exportó una tonelada de antocianinas y, en el año 2018, la exportación subió a 21.3 toneladas (Figura 1). Los territorios a los cuales se ha exportado antocianina son: Estados Unidos, Corea y la Unión Europea, siendo Estados Unidos el país que lidera la compra de antocianina con el 85.6 % en el año 2020.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277





Figura 1. Exportación antocianina del año 2002 a 2020.



Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria -SUNAT (2023).

Tabla 1. Destino y valor de las exportaciones de maíz morado (2010-2020).

	2010		2015		2020	
	mil USD	%	mil USD	%	mil USD	%
Mundo	591	100	1079	100	1542	100
Estados Unidos	354	59,9	683	63.3	656	42.5
Unión Europea	123	20.8	151	14.0	486	31.5
Ecuador	54	9.1	161	14.9	264	17.1
Chile	3	0.5	32	3.0	68	4.4
Japón	12	2.0	19	1.8	24	1.6
Canadá	3	0.5	15	1.4	22	1.4
Otros países	42	7.1	18	1.7	22	1.4

Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria - SUNAT (2023).

Grobman indica que la raza Kculli ha dado origen a los maíces morados con alta concentración de antocianinas, que proceden de las alturas de la sierra central peruana [25]. La raza Kculli es una de las más de 50 razas de maíz descritas en el Perú [26,27,28]. Kculli en quechua significa negro. Mangelsdorf afirma que, en Perú, Bolivia, Ecuador, Chile, Argentina y Colombia existen razas con pericarpio y aleurona de colores que pudieron haber sido derivadas de la raza Kculli [25].

La presencia de antocianinas en el maíz morado es la principal característica de este tipo de maíz. Las antocianinas del maíz morado son pigmentos naturales hidrosolubles del grupo de los flavonoides y están presentes en las vacuolas de células vegetales que otorgan el color rojo, púrpura o azul a las hojas, flores y frutos de los arándanos, cerezas, frambuesas, repollo morado, berenjena y maíz [29,30].

Las antocianinas del maíz, que aportan múltiples beneficios para la salud humana, producen un color morado oscuro en las tusas o corontas, brácteas o pancas, y en los

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



granos, lo que resulta por la acción de los alelos dominantes A, B y Pr. El color de la planta está dado por el gen Pr [28,31]. La interrelación entre estos genes está influenciada por la interacción con factores ambientales como la luz solar y los diferentes estreses abióticos donde se desarrolle el cultivo.

La expresión de las antocianinas en el maíz depende del genotipo, es decir la raza, variedad o híbrido de maíz. Asimismo, depende del órgano de la planta donde se expresa y de las condiciones ambientales donde la planta crece. El contenido de antocianinas en el maíz morado es alto, equivalente a 1642 mg/100g de producto fresco entero; otros alimentos con cantidades expresadas en las mismas unidades son el arándano *Vaccinium* sp (558), la frambuesa negra *Rubus occidentalis* (589), la berenjena *Solanum melongena* (750), las uvas rojas y negras *Vitis sp* (888), y *Aronia melanocarpa* (1480) [32].

La producción de maíz morado en el Perú se ha quintuplicado en los últimos 20 años pasando de 4.9 mil toneladas en 2003 a 24.6 mil toneladas en 2020. Este aumento se debe principalmente al incremento de la superficie sembrada que se triplicó pasando de 1.5 mil ha a 4.4 mil ha para el mismo periodo. Respecto al rendimiento de grano, hasta 2010 fue menor a 5.0 t/ha, y a la fecha se mantiene en alrededor de 5.6 t/ha (Tabla 2).

Tabla 2. Producción de maíz morado en el Perú desde 2003 hasta 2020.

Año	Superficie (mil ha)	Producción (mil toneladas)	Rendimiento (t/ha)
2003	1.5	4.9	3.3
2004	1.5	5.0	3.3
2005	1.8	7.7	4.3
2006	1.9	8.0	4.2
2007	2.2	10.5	4.8
2008	2.9	13.6	4.7
2009	3.1	15.1	4.9
2010	3.4	16.9	5.0
2011	3.3	17.8	5.4
2012	3.7	20.0	5.4
2013	3.5	20.1	5.7
2014	3.2	18.0	5.6
2015	3.8	21.2	5.6
2016	3.9	21.5	5.5
2017	4.4	23.5	5.3
2018	4.2	23.2	5.5
2019	4.4	23.1	5.3
2020	4.4	24.6	5.6

Fuente: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI),
Sistema Integrado de Estadística Agraria (SIEA).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



La mayor producción de maíz morado en el Perú se da en las regiones costa y sierra. Para el año 2020 (Figura 2) y para el año 2021 (Tabla 3) las regiones de Lima, Ayacucho, Cajamarca, Arequipa y Ancash fueron las de mayor producción, similar a los años precedentes. La producción el año 2021 alcanzó el 85 % del total en estas cinco regiones. La región de Lima contribuye con el 40 %, y las otras cuatro regiones contribuyen con alrededor de 10 % cada una.

Tabla 3. Producción de maíz morado por región en el Perú (2021).

Región	Superficie		Rendimiento	Producción	
	ha	%	(t/ha)	t	%
Nacional	**3875**	**100**	**5.1**	**20091**	**100**
Lima	1216	31	6.6	8008	40
Ayacucho	763	20	3.4	2812	13
Cajamarca	613	16	3.8	2347	12
Arequipa	377	10	5.3	1999	10
Ancash	376	10	5.2	1948	10
Otras	530	13		2377	15

Fuente: Compendio Anual de Producción Agrícola. Ministerio de Agricultura y Riego - Dirección General de Estadística, Seguimiento y Evaluación de Políticas - Dirección de Estadística e Información Agraria. https://www.gob.pe/institucion/midagri/informes-publicaciones/2730325-compendio-anual-de-produccion-agricola

Figura 2. Regiones productoras de maíz morado en el Perú (t) el año 2020.

Fuente: Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas – DGESEP

El aumento en el consumo de maíz morado ha sido el factor determinante para el incremento de la demanda en el Perú. Actualmente se consume chicha morada en todo el país y se ha diversificado el consumo de otros productos alimenticios en muchas

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



regiones. Diversas actividades, como ferias en varios puntos del país, están determinando una mayor utilización en la agroindustria y, por lo tanto, el incremento de la demanda de maíz morado. No obstante, el aporte del maíz al PBI de la producción agrícola para el año 2020 es baja: equivalente al 5.9 % entre todos los tipos de maíz (duro, amiláceo, choclo, morado). De la misma manera, el maíz morado contribuye solo con el 0.09 % [32]. Este hecho es un reto y una oportunidad para incrementar la producción del maíz morado en beneficio de la humanidad aprovechando las propiedades de las antocianinas presentes en la coronta o tusa, la panca o brácteas y el grano de la planta. De esta forma se pueden utilizar las ventajas comparativas del cultivo como alimento funcional y como insumo para la industria farmacéutica, entre otras.

En consecuencia, se deben incrementar los trabajos de maíz morado en el Perú, tanto para aumentar el consumo interno como para la exportación, a través de la cual el mundo puede beneficiarse de sus propiedades funcionales, antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas, entre otras.

Para mejorar la eficiencia en la utilización de germoplasma de la raza Kculli, se requiere desarrollar cultivares (variedades e híbridos) y conocer su comportamiento en diferentes ambientes donde se evalúe tanto la producción de grano, como el contenido de antocianinas en el grano, la tusa y la coronta. En el Perú se han generado variedades por la UNALM y por el INIA principalmente. El MIDAGRI [32] describe hasta 10 variedades de maíz morado: seis variedades locales denominadas como las "más conocidas" y cuatro variedades mejoradas.

A continuación, se resumen las características de las seis variedades "más conocidas":

- **Cusco Morado:** variedad relacionada a la raza Cusco Gigante. Se cultiva en zonas de altitud intermedia en los departamentos de Cusco y Apurímac.
- **Morado Canteño:** derivada de la raza Cusco, pero más precoz. Se cultiva principalmente en las partes altas del valle Chillón en Lima, hasta 2500 m s.n.m. Es la variedad de mayor consumo en Lima.
- **Morado de Caraz:** derivada de las razas Ancashino y Alazán. De precocidad intermedia, se cultiva en la sierra y costa de la región de Ancash. Muestra buen potencial de rendimiento y las corontas son más pigmentadas que las de otras variedades.
- **Arequipeño:** forma de la mazorca similar a la raza Cusco. Procede de la sierra de Arequipa y es precoz. El color de la tusa no es tan intenso como en otras variedades.
- **Negro de Junín:** variedad precoz de granos negros, grandes, dispuestos irregularmente en una mazorca corta y redondeada similar a la raza San Jerónimo.
- **Huancavelicano:** se encuentra en la sierra centro y sur, hasta Arequipa. Se siembra a mayores altitudes que las otras variedades.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



Las 4 variedades mejoradas son:

- **PMV-581:** variedad desarrollada por la UNALM, derivada de la variedad morado de Caraz, adaptada a la costa y sierra baja, con resistencia a roya y *Cercospora* sp. Su periodo vegetativo es intermedio, con mazorcas medianas, alargadas, con alto contenido de antocianina y potencial de rendimiento de 6.0 t/ha [27].

- **PMV-582:** variedad mejorada por la UNALM, adaptada para las condiciones de la sierra alta.

- **INIA-601:** desarrollada por el INIA, Estación Experimental Baños del Inca, Cajamarca. Formada con 108 progenies de la variedad Morado de Caraz y 148 progenies de la variedad Negro de Parubamba [33]. Fue liberada el año 2000. Tiene alto contenido de antocianina en coronta y brácteas [24].

- **INIA-615 Negro Canaán:** desarrollada por el INIA, Estación Experimental Canaán, Ayacucho. Está formada por 36 colecciones de la raza Kculli y fue liberada el año 2007.

Respecto a investigaciones recientes, se ha presentado un estudio de evaluación de seis variedades comerciales de maíz morado en 18 ambientes de la región de Cajamarca [24]. Las variedades fueron INIA-601, Sintético Maíz Morado, INIA-615, UNC-47, PMV-581 y Canteño. Los ambientes de evaluación estuvieron ubicados entre 2388 y 3175 m s.n.m. El manejo de los ensayos se hizo con una fertilización de acuerdo con el ambiente, aunque sin mucha variación entre ellos. La dosis de nitrógeno osciló entre 100 y 120 unidades, la de fósforo entre 40 y 60 unidades de P_2O_5, y la de potasio de 40 unidades de K_2O. La densidad de siembra fue de 50000 plantas/ha. El control de insectos se realizó de acuerdo con el requerimiento del cultivo, mas no se hizo control para enfermedades.

Los resultados mostraron que hay interacción genotipo-ambiente altamente significativa ($P < 0.001$), lo que indica que el comportamiento de cada variedad fue diferente de acuerdo con el ambiente de evaluación; por esta razón se calculó el valor de estabilidad promedio (ASV = Average Stability Value). Los valores de ASV fueron de 0.23 para INIA-615, 0.47 para UNC-47, 0.68 para INIA-601, 0.71 para el Sintético Maíz Morado, 1.03 para PMV-581 y 1.54 para Canteño.

Las variedades más estables son aquellas que tienen menores valores de ASV, los mismos que pueden ser explicados porque las variedades UNC-47, INIA-601 y Sintético Maíz Morado tienen como fuente de germoplasma tipos de maíz morado adaptados a las condiciones de Cajamarca, donde se realizaron los experimentos. Los mayores valores de ASV corresponden a PMV-581 y Canteño, variedades mejor adaptadas a la costa y la sierra baja; especial explicación se requiere para la variedad INIA-615. El rendimiento promedio de grano al 14 % de humedad oscila entre 2.77 t/ha (INIA 601) y 1.90 t/ha (Canteño) (Tabla 4).

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



Tabla 4. Rendimiento de grano, ASV (Average Stability Value) y contenido de antocianinas de seis variedades de maíz morado evaluadas en la región de Cajamarca.

Variedad	Rendimiento de grano	ASV	Antocianinas	
			Coronta	Brácteas
	------- (t/ha) -------		---------------- (%) ----------------	
INIA 601	2.77 a	0.68	6.12 a	3.18 a
Sintético MM	2.50 ab	0.71	5.63 a	1.76 b
INIA 615	2.40 b	0.23	5.44 a	1.18 b
UNC 47	2.31 b	0.47	5.7 a	1.9 b
PMV 581	2.15 c	1.02	4.14 b	0.8 c
Canteño	1.90 d	1.54	4.66 b	0.63 c
Promedio	**2.34**	**0.78**	**5.28**	**1.58**

Promedios seguidos de la misma letra en la vertical no son diferentes estadísticamente por la prueba de Tuckey
Fuente: [24]

En el mismo estudio [24] se reportó que el porcentaje de antocianinas en la coronta (5.28 %) fue tres veces mayor que en las brácteas (1.58 %). Los valores de antocianinas en la coronta fueron mayores para INIA-601 (6.12 %), Sintético MM (5.63 %), INIA-615 (5.44 %) y UNC-47 (5.7 %), sin diferencia significativa entre ellas. Por otra parte, las variedades PMV-581 y Canteño mostraron menores valores: 4.14 % y 4.66 %, respectivamente. Con relación al contenido de antocianinas en las brácteas, se observaron 3 grupos: la variedad INIA-601 tuvo el mayor valor equivalente a 3.18 %, el segundo grupo lo integró Sintético MM con 1.76 %, INIA-615 con 1.18 % y UNC-47 con 1.9 %, sin diferencia significativa entre ellas; el tercer grupo lo formaron las variedades PMV-581 y Canteño con valores de 0.8 % y 0.63 %, respectivamente (Tabla 4).

Con base en estos resultados se está estudiando ampliamente la adaptación de las variedades, incluyendo 30 localidades en diferentes regiones del país. Se presentan los resultados de dos localidades, una en la costa (Mala, Lima) ubicada a 80 m s.n.m. y una en la sierra (Baños del Inca, Cajamarca) a 2666 m s.n.m. El ensayo en Cajamarca fue sembrado en la época normal de siembra (diciembre de 2022 a julio de 2023), y solo se requirió un riego al momento de la floración por ausencia de lluvias en esta época. Mientras que, en Lima, el ensayo fue conducido entre mayo y septiembre de 2023 con aplicación de riego semanal, por goteo. El manejo del cultivo, la fertilización, la densidad de siembra, y el control de malezas y plagas fueron estándar en la conducción de estos ensayos en ambas localidades.

Los datos de rendimiento de grano son expresados al 14 % de humedad. En la localidad de Cajamarca el rendimiento promedio fue de 6.78 t/ha sin diferencia significativa entre las variedades. En cambio, en Lima el rendimiento promedio fue de 5.46 t/ha y se observó diferencia significativa entre las variedades; INIA-615 tuvo el mayor rendimiento (6.70 t/ha) superior al rendimiento de la variedad testigo INIA-601, que rindió 3.70 t/ha (Tabla 5). Es importante notar que el rendimiento de la variedad INIA-615 fue similar al rendimiento de las variedades Canteño (6.64 t/ha) y PMV-581 (6.40 t/ha); estas últimas

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



recomendadas para la costa y la sierra baja. Por lo tanto, es un resultado esperado, ya que las variedades INIA-601 y Sintético MM, desarrolladas para condiciones de sierra media-alta, mostraron menor rendimiento (3.8 t/ha). Con la determinación de antocianinas para cada variedad en cada localidad, trabajo en ejecución, se tendrá una idea más clara de la adaptación de las variedades a las diferentes condiciones ambientales del país y su variación en el contenido de antocianinas.

Tabla 5. Rendimiento (t/ha) de cinco variedades de maíz morado en dos localidades de Perú (2023).

Variedades	Localidades	
	Baños del Inca Cajamarca	Mala Lima
Canteño	5.95 a	6.64 a
INIA 601 (T)	7.21 a	3.70 b
INIA 615	7.93 a	6.70 a
PMV 581	6.42 a	6.40 a
Sintético MM	6.39 a	3.86 b
Promedio	**6.78**	**5.46**
LSD (0.05)	2.67	1.40
CV	11.6	26.1

Promedios seguidos de la misma letra en la vertical no son diferentes estadísticamente por la prueba de Tuckey.

La información que se ha generado, permitirá incrementar la producción por región geográfica para promover el mayor consumo interno, así como la exportación. Respecto al comercio internacional, la exportación del maíz morado ha tenido un crecimiento significativo habiéndose triplicado entre 2010 y 2020, pasando de 396 a 1247 toneladas para este periodo; en forma similar el valor de las exportaciones se incrementó de 591 mil USD a 1.542 millones de USD para 2010 y 2020, respectivamente (Tabla 6 y Figura 3).

Figura 3. Exportación de maíz morado (t) desde 2001 hasta 2020.

Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria -SUNAT (2023).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



Tabla 6. Volumen y valor de la exportación de maíz morado y derivados (2010-2020).

Año	Volumen (t)	Valor (mil USD)
2010	396	591
2015	810	1079
2020	1242	1542

Fuente: Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria - SUNAT (2023).

MAÍZ BIOFORTIFICADO CON ZINC

Existe alto riesgo de deficiencia de Zn en la alimentación de varios países de Latinoamérica. En el Perú, el 41.6 % de la población consume una cantidad insuficiente de Zn. El 18.3 % de los niños menores de cinco años padece de raquitismo; esta prevalencia asciende al 32 % en las zonas rurales y al 37 % en la población más pobre. La deficiencia de Zn conlleva retrasos del crecimiento, incremento de la morbilidad en enfermedades infecciosas, especialmente virales, diarrea y neumonía, principalmente en los dos primeros años de vida. El Zn es un cofactor esencial para muchas enzimas y juega un rol importante en la síntesis de DNA y RNA y en la expresión de genes. La deficiencia de Zn controla la absorción de hierro en los intestinos, por lo tanto, estos micronutrientes deben ser reconocidos en la salud pública global como mencionan Nriagu (2007), Chang et al. (2010) y Graham et al. (2012), citados por [34].

Con la finalidad de aprovechar las bondades de los maíces con alto contenido de Zn y de provitamina A en el Perú, se están evaluando variedades e híbridos procedentes del CIMMYT. Los maíces normales (no biofortificados), tienen un contenido de Zn de alrededor de 22 ppm, mientras que los biofortificados tienen más de 34 ppm.

Variedades de maíz biofortificado con Zn han sido evaluadas en tres localidades: dos en la sierra y una en la costa. En la sierra, en la localidad de Chagualito, distrito de Cochorco, provincia de Sánchez Carrión, departamento de La Libertad, ubicada a 1200 m s.n.m., se sembraron los ensayos en los años 2021 y 2022. El experimento en la costa fue sembrado en Lima, en la UNALM, en el año 2021. En ambas localidades, los experimentos fueron conducidos de acuerdo con las recomendaciones para cada localidad, utilizando como testigo la variedad de polinización abierta Marginal 28 Tropical (M28T).

No hubo diferencia significativa para rendimiento de grano entre las seis variedades en ninguna de las tres localidades (Tabla 7). El rendimiento de grano en la localidad de Lima fue tres veces superior al de las localidades de la sierra. Esto puede darse debido al tipo de germoplasma, ya que tanto las variedades biofortificadas con Zn como el testigo M28T se adaptan mejor al trópico bajo como a la costa; otro aspecto puede ser la disponibilidad de agua para la planta, ya que en Lima se riega cada vez que el cultivo lo necesita, y en la sierra el cultivo depende de la ocurrencia de lluvias. Esto ha determinado que el rendimiento promedio en Lima sea de 10.5 t/ha y en Chagualito

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



menor a 4.0 t/ha. Tanto en Lima como en Chagualito las variedades biofortificadas con Zn tendieron a rendir más que las no biofortificadas, ventaja nutricional que debería ser aprovechada por los consumidores en todo el mundo.

Tabla 7. Rendimiento de grano de seis variedades de maíz biofortificado con zinc.

N°	Variedad	Chagualito 1		Lima - UNALM		Chagualito 2	
		t/ha	Ranking	t/ha	Ranking	t/ha	Ranking
1	S13LTWQHZNHGAB01	3.6	4	10.3	5	2.8	6
2	S13LTWQHZNHGAB02	3.6	4	10.8	4	4.6	1
3	S13LTWQHZNHGAB03	4.9	1	11.4	1	3.2	4
4	CCSZN1	4.5	2	8.7	6	3.8	2
5	CCSZN2	3.7	3	11.2	2	2.9	5
6	Marginal 28 Tropical (M28T)	2.9	5	10.8	3	3.7	3
	Promedio	**3.9**		**10.5**		**3.5**	
	LSD (0.05)	2.9		2.2		1.6	
	CV	18.5		9.5		18.8	

Para que, en una comparación planeada de cualquier característica exista significancia, el valor de la comparación entre la mejor variedad y el testigo debe ser mayor al valor de LSD [47]. En este caso, los valores para Chagualito 1 son 2.0 t/ha (resultado de 4.9 - 2.9) y 2.9 t/ha, respectivamente; por lo tanto, no hay diferencia significativa. Siguiendo el mismo principio, en Lima-UNALM, el valor de 0.6 t/ha (resultado de 11.4 - 10.8) es menor que LSD = 2.2 t/ha; por lo tanto, tampoco hay diferencia significativa. Lo mismo sucede en la localidad Chagualito 2, en la que los valores son 0.9 (resultado de 4.6 - 3.7) y 1.6, respectivamente.

En otro estudio se evaluaron 20 híbridos, de los cuales 17 son biofortificados y tres son testigos no biofortificados. Los experimentos fueron sembrados en los años 2021 y 2023 en dos localidades: Chagualito y la Estación Experimental Agraria (EEA) Donoso en Huaral, Lima. La localidad Chagualito está ubicada a 1200 m s.n.m. y la EEA Donoso a 126 m s.n.m. No hubo diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos en ninguna de las dos localidades (Tabla 8).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



Tabla 8. Rendimiento de 20 híbridos de maíz biofortificado con zinc (2021 y 2023).

N°	Híbrido	EEA Donoso - Lima				Chagualito - La Libertad			
		Rendimiento		Pudrición de mazorca		Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking	(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	CLTHWZN17007	14.3	4	2.6	7	5.5	17	5.9	8
2	CLTHWZN17010	12.6	17	3.1	4	6.5	3	4.4	13
3	CLTHWZN17022	13.6	8	1.7	15	6.5	4	4.1	16
4	CLTHWZN18006	12.5	18	2.7	6	6.3	9	4.8	11
5	CLTHWZN18081	14.5	3	1.8	13	6.1	12	4.0	18
6	CLTHWZN17103	13.7	6	2.0	11	6.3	10	4.1	17
7	CLTHWZN17105	12.4	19	1.0	19	6.5	5	6.1	4
8	CLTHWZN18201	11.5	20	3.0	5	5.6	16	2.4	20
9	CLTHWZN18203	14.9	1	0.9	20	6.5	6	6.5	3
10	CLTHWZN18204	14.3	5	1.2	17	5.8	13	6.0	6
11	CLTHWZN18209	12.7	16	4.5	2	5.7	14	5.9	9
12	CLTHWZN18211	13.0	13	1.9	12	6.5	7	4.2	15
13	CLTHWZN18212	13.2	10	4.8	1	5.7	15	5.5	10
14	CLTHWZN16051	13.1	11	3.4	3	5.4	18	4.3	14
15	CLTHWZN15010	13.7	7	2.4	9	5.1	19	3.1	19
16	CLTHWZN17120	12.8	15	1.8	14	6.4	8	4.6	12
17	CLTHWZN17117	12.9	14	2.5	8	6.3	11	6.0	7
18	CLTHW14003	14.8	2	1.1	18	5.0	20	6.1	5
19	INIA 619	13.1	12	2.4	10	6.9	1	6.8	2
20	M28T	13.3	9	1.5	16	6.8	2	9.4	1
	Promedio	**13.4**		**2.3**		**6.1**		**5.2**	
	LSD (0.05)	3.26		2.3		1.17		3.3	
	CV	6.64		46		9.18		29	
	Mejor híbrido	**14.9**		**0.9**		**6.5**		**2.4**	
	Diferencia	1.6		0.6		0.4		4.4	
	Significación	ns		ns		ns		*	

No se encontró diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos en ninguna de las dos localidades, porque los valores de la comparación entre el mejor híbrido y el mejor testigo, 1.6 y 0.4, fueron inferiores a los valores de LSD, 3.26 y 1.17, respectivamente. Con relación a pudrición de mazorca hubo diferencia significativa entre híbridos en Chagualito más no en Lima. En Chagualito, el testigo con menor pudrición fue el híbrido 19 (6.8 %), el híbrido experimental con menor pudrición fue el híbrido 8 (2.4 %), LSD = 3.3 %.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



El rendimiento de grano (14 % de humedad) en la localidad de Lima fue dos veces superior al de Chagualito, y la pudrición de mazorca fue el doble en Chagualito que en Lima. Con relación al rendimiento de grano, el promedio en Lima fue de 13.4 t/ha y el rango de variación entre 11.5 y 14.9 t/ha; mientras que en Chagualito, el rendimiento promedio fue de 6.1 t/ha con un rango de variación entre 5.0 y 6.9 t/ha. Las razones por las cuales se obtuvo mayor rendimiento en la costa que en la sierra son las mismas indicadas para el caso de la evaluación de variedades.

Con relación a la pudrición de la mazorca, no hubo diferencia significativa entre híbridos en Lima, pero si en Chagualito. En Lima la pudrición de mazorca para el mejor híbrido fue del 0.9 % (híbrido 9), comparado con el 1.5 % del mejor testigo (M28T); el valor de LSD fue 2.3. En Chagualito, el híbrido con menor pudrición fue el número 8 con el 2.4 % comparado con el 6.8 % para el mejor testigo (INIA-619); el valor de LSD fue de 3.3. (Tabla 8). *Fusarium* sp. fue la principal causa de la pudrición de mazorca. Como en el caso de la evaluación de variedades, los híbridos biofortificados tienen similar rendimiento que los híbridos testigo, lo que significa una ventaja en favor de los maíces biofortificados por su mayor contenido de Zn, y mejora el valor nutricional de estos tipos de maíz.

Otro ensayo fue sembrado en Lima – UNALM, en el año 2022. En este ensayo se evaluaron 20 híbridos diferentes a los indicados en el anterior estudio: 17 híbridos biofortificados y 3 híbridos testigo (híbridos 17, 18 y 19). En la Tabla 9 se presenta el rendimiento de grano (t/ha) al 14 % de humedad y el contenido de Zn en partes por millón (ppm) de los híbridos. No se observó diferencia significativa para rendimiento de grano entre los 20 híbridos. El rendimiento promedio fue de 11.6 t/ha. Asimismo, se observó la tendencia de mayor rendimiento para algunos híbridos biofortificados como el híbrido 10 con 13.9 t/ha. Con relación al contenido de Zn en el grano, se considera que un maíz no biofortificado debe tener alrededor de 22 ppm, y que un maíz biofortificado debe tener más de 33 ppm. Según este criterio, 10 híbridos tienen un contenido de Zn superior al 33 %. El híbrido 14 (CLTHW16138) posee un contenido de Zn muy alto (44.5 ppm) y también un alto rendimiento (13.7 t/ha); por lo tanto, es un candidato para ser liberado si se ratifica este comportamiento en posteriores evaluaciones. Los híbridos con cantidades de Zn mayores a 37 ppm pueden servir como fuentes para la obtención de germoplasma con esta característica. El híbrido 19 (testigo) tiene 37.5 ppm de Zn, y es un híbrido biofortificado liberado en Colombia por su alto contenido de Zn y su alto potencial de rendimiento. Los resultados obtenidos en el estudio ratifican las características de este híbrido.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277

Artículo/Article
Sección B/Section B
Vol. 16, nro. 2
e3277



Tabla 9. Rendimiento de 20 híbridos de maíz biofortificado con zinc (2022).

N°	Híbrido	Rendimiento		Contenido de zinc	
		t/ha	Ranking	ppm	Ranking
1	CLTHWZN17113	8.7	20	28.0	20
2	CLTHWZN18212	9.0	19	31.5	12
3	CLTHWZN19502	11.1	13	39.5	3
4	CLTHWZN19514	12.2	8	29.5	16
5	CLTHWZN19518	10.8	17	31.5	13
6	CLTHWZN19520	10.9	16	29.5	17
7	CLTHWZN19523	12.8	4	35.0	9
8	CLTHWZN20524	13.1	3	29.5	18
9	CLTHWZN20525	12.2	7	34.0	10
10	CLTHWZN17009	13.9	1	29.5	19
11	CLTHWZN18018	9.7	18	37.5	5
12	CLTHWZN20529	11.5	12	36.5	7
13	CLTHWZN20530	11.6	11	38.0	4
14	CLTHW16138	13.7	2	44.5	1
15	CLTHWZN20533	11.0	15	41.5	2
16	CLTHWZN17103	12.3	6	35.5	8
17	CLTHWZN18209	12.6	5	31.5	14
18	CLTHW14003	11.8	9	33.3	11
19	SGBIO H2	11.6	10	37.5	6
20	PM 213	11.0	14	31.5	15
	Promedio	**11.6**			
	LSD (0.05)	2.9			
	CV	11.9			
	Mejor híbrido	**13.9**			
	Diferencia	2.9			
	Significación	ns			

Para rendimiento de grano, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (13.9 t/ha) y el del mejor testigo (11.6 t/ha) fue de 2.3 t/ha; el valor de LSD es 2.9 t/ha; por lo tanto no hay diferencia significativa, criterio utilizado en la interpretacion de resultados en esta publicacion [47].

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



MAÍZ BIOFORTIFICADO CON PROVITAMINA A (ProA)

La deficiencia de vitamina A afecta al 12 % de niños menores de cinco años en Perú. Su carencia debilita el sistema inmunológico, causa xeroftalmia de la córnea, e incluso ceguera completa. Estudios de biodisponibilidad han demostrado que la ProA se convierte eficientemente en retinol, la forma de vitamina A utilizada por el cuerpo humano y, por lo tanto, este beneficio puede ser aprovechado con el consumo de alimentos con mayor contenido de provitamina A [35]. Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los normales [36]. En cambio, el maíz blanco no contiene ProA. La investigación y promoción del cultivo de maíz amarillo biofortificado con ProA puede ser una alternativa viable en el Perú y en el mundo, ya que las gallinas ponedoras que consumen este tipo de maíz producen huevos con yemas con mayor contenido de ProA que beneficiaría a la población rural y urbana.

Con la finalidad de implementar esta idea se empezó a evaluar este tipo de maíz en ambientes de la sierra y la costa del Perú. El año 2020 fueron instalados dos ensayos de evaluación de variedades en dos localidades: EEA Vista Florida del INIA en la región Lambayeque y Chagualito en la región La Libertad. En ambas localidades se evaluaron 10 cultivares, de las cuales 3 variedades son biofortificadas con ProA, 5 biofortificadas con Zn y 2 híbridos testigo no biofortificados: uno de color blanco (T1) y otro de color amarillo (T2).

En Vista Florida, el rendimiento promedio fue de 5.9 t/ha y no se observó diferencia significativa entre los cultivares evaluados. Sin embargo, se observa la tendencia de mayor rendimiento de los híbridos testigo con alrededor de 7.5 t/ha, mientras que el rendimiento de las variedades biofortificadas con ProA (cultivares 6, 7 y 8) rindieron entre 3.2 y 6.5 t/ha (Tabla 10). En Chagualito, el rendimiento promedio fue de 6.3 t/ha y tampoco se observó diferencia significativa entre los cultivares evaluados. Se detectó también la tendencia de mayor rendimiento de los híbridos testigo siendo el más alto del T1 (7.8 t/ha). Por otro lado, el rendimiento de las variedades biofortificadas con ProA osciló entre 3.7 y 6.0 t/ha. En la Tabla 10 se presenta el porcentaje de pudrición de mazorca que solo fue evaluado en Chagualito (sin encontrar diferencias significativas). En Vista Florida los daños por esta causa fueron muy pequeños. En Chagualito el mayor valor de pudrición de mazorca fue de 4.8 %, correspondiente al cultivar 6, y el menor de 0.3 % correspondiente a T2. Tanto las variedades biofortificadas con ProA como los demás cultivares evaluados mostraron similares características morfológicas y fisiológicas como altura de planta y mazorca, días a la floración masculina y femenina, etc.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277





Tabla 10. Evaluación de variedades de maíz biofortificado con ProA (2020).

N°	Cultivar	EEA Vista Florida, Lambayeque		Chagualito, La Libertad			
		Rendimiento		Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	S13LTWQHZNHGAB02	5.7	6	5.1	9	3.5	4
2	CCSZN1	4.8	9	6.2	6	3.5	5
3	HEZN002	5.3	7	7.4	3	2.2	6
4	HEZN006	6.2	5	7.9	1	1.2	8
5	HEZN007	7.1	3	6.7	5	1.5	7
6	CCSPROA1	5.3	8	5.6	8	4.8	1
7	CCSPROA2	6.5	4	6.0	7	4.2	2
8	HIGPROASYN3-BULK#1-B	3.2	10	3.7	10	3.9	3
9	Híbrido blanco (T1)	7.8	1	7.8	2	1.2	9
10	Híbrido amarillo (T2)	7.3	2	6.9	4	0.3	10
	Promedio	**5.9**		**6.3**		**2.6**	
	LSD (0.05)	2.7		1.0		3.8	
	CV	22.9		20.3		59	
	Mejor cultivar	**7.1**		**7.9**		**1.2**	
	Diferencia	0.7		0.1		0.9	
	Significación	ns		ns		ns	

Para rendimiento de grano en la EEA Vista Florida, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (7.1 t/ha) y el del mejor testigo (7.8 t/ha) fue de -0.7 t/ha; el valor de LSD fue 2.7 t/ha. Para rendimiento de grano en Chagualito, la diferencia entre el híbrido de mayor rendimiento (7.9 t/ha) y el del mejor testigo (7.8 t/ha) fue de 0.1 t/ha; el valor de LSD es 1.0 t/ha; por lo tanto no hay diferencia significativa para rendimiento en las dos localidades. Para pudrición de mazorca en Chagualito la diferencia entre el mejor testigo (0.3 %) y el mejor híbrido (1.2 %), fue de 0.9 %; el valor de LSD fue 3.8 %, por lo tanto tampoco hubo diferencia significativa.

En base a los resultados obtenidos, el año 2023 se sembró un nuevo ensayo con 22 híbridos biofortificados con ProA en la UNALM en Lima, y se incluyó dos híbridos testigo no biofortificados (Tabla 11).

Con relación al rendimiento de grano, es importante destacar el alto potencial de los maíces biofortificados. No existe diferencia entre el rendimiento del mejor híbrido CLHP0003/CLHP0005&CML304 (híbrido 19) con 14.0 t/ha y el mejor híbrido testigo con 11.1 t/ha, que corresponde a un híbrido amarillo comercial ampliamente difundido tanto en el Perú como en otros países. Esto indica que se pueden conseguir beneficios adicionales de los maíces biofortificados por su alto potencial de rendimiento. Al menos 12 híbridos biofortificados tuvieron rendimientos superiores al del mejor testigo (Tabla 11).

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277

Tabla 11. Evaluación de híbridos de maíz biofortificado con ProA sembrado en la UNALM (2023).

N°	Híbrido	Rendimiento		Pudrición de mazorca	
		(t/ha)	Ranking	(%)	Ranking
1	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00294/Cl7//CML451)-20-1-2-1-B	11.2	10	4.4	6
2	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00294/Cl7//CML451)-28-1-1-1-B	12.2	4	3.1	14
3	CLHP0003/CLHP0005&(CLHP00478/(CAROTENOIDSYN3-FS8-4-6-B/CML324-B//KUI3/B77)-S2-1//CML304)-135-1-2-2-B	11.5	8	1.5	22
4	HPYL1814/CLHP00306&(CLHP0345///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-2-1-3-1-B	10.2	20	1.7	21
5	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0345///CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-3(MAS:L4H1)-2-B*4//CLHP0005)-#-166-1-3-1-B	12.2	5	3.1	15
6	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-34-1-1-1-B	10.9	14	2.3	18
7	CLHP0014/CLHP0003&(CLHP00306///CML451/(KUICAROTENOIDSYN-FS11-1-1-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-2(MAS:L4H1)-3-B*4//CML451)-#-18-1-2-2-B	10.8	15	3.2	13
8	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0303///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-24-1-1-1-B	10.7	16	5.9	2
9	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0345///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-55-1-1-2-B	10.2	21	3.1	16
10	CLHP0014/CLHP0003&(CLHP00294/Cl7//CML451)-59-1-3-1-B	11.6	6	4.9	3
11	HPYL1814/CLHP00294&(CLHP0303///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-7-1-1-1-B	10.7	17	4.0	11
12	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345///CML537/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-4(MAS:L4H1)-1-B*4//CML537)-#-59-2-3-1-B	10.5	19	4.8	4
13	HPYL187/CLHP00306&(CLHP0345///CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-3(MAS:L4H1)-2-B*4//CLHP0005)-#-166-1-3-1-B	11.2	11	4.1	7
14	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1924	7.7	23	4.1	8
15	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1834	11.4	9	4.8	5
16	CLHP0003/CLHP0005&HPYL1848	11.6	7	3.5	12
17	CLHP0049/CML297&HPYL1830	9.8	22	4.1	9
18	CLHP0049/CML297&HPYL1846	5.5	24	7.2	1
19	CLHP0003/CLHP0005&CML304	14.0	1	2.2	19
20	HPL14460/CLHP0020&(CLHP0345///CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-1(MAS:L4H1)-4-B*4//CLHP0005)-B-89-2-2-1-B	11.2	12	2.6	17
21	CLHP0049/CML297&(CLHP0345///CLHP0005/(KUICAROTENOIDSYN-FS17-3-2-B*3/(KU1409/DE3/KU1409)-B-B-18-2-B)-B-1(MAS:L4H1)-4-B*4//CLHP0005)-B-89-2-2-1-B	13.0	2	2.1	20
22	CLHP00286&CSL1683	12.3	3	4.1	10
23	Testigo 1	11.1	13	1.3	23
24	Testigo2	10.7	18	0.9	24
	Promedio	**10.9**		**3.4**	
	LSD (0.05)	3.2		5.0	
	CV	15		44	
	Mejor híbrido	**14.0**		**1.5**	
	Diferencia	2.9		0.9	
	Significación	ns		ns	

No hay diferencia significativa ni para el rendimiento ni para la pudrición de mazorca, porque los valores de las comparaciones fueron 2.9 y 0.9, inferiores a los valores de LSD 3.2 y 5.0, respectivamente.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



La estrategia que se quiere ensayar y promover es aprovechar el alto potencial de rendimiento y mayor contenido de ProA para que las gallinas ponedoras puedan producir huevos con yema amarilla con alta ProA y de esta forma beneficiar a la población que consume huevos en su dieta. Se evaluó también la pudrición de mazorca sin diferencia entre la pudrición del mejor híbrido y la del testigo (Tabla 11).

La investigación y promoción de los maíces bifortificados con alto contenido de Zn y provitamina A debería ser una prioridad de los países para beneficiarse de este atributo, principalmente para los consumidores de áreas rurales con difícil acceso a los programas de suplementación, pero que sí podrían producir estos cultivos biofortificados.

MAÍZ DE ALTA CALIDAD DE PROTEÍNA

Se denomina maíces de alta calidad de proteína a aquellos que poseen granos con mayor contenido de lisina y triptófano que los maíces normales. La lisina y el triptófano son dos aminoácidos esenciales para el hombre y para los animales monogástricos. Originalmente se denominaron maíces opacos por la apariencia suave (no traslúcida) del endospermo [37]. Esta característica está dada por un gen recesivo denominado o_2, ubicado en el cromosoma 7 del genoma de maíz.

El endospermo suave de los maíces opacos determina efectos pleiotrópicos negativos como disminución de rendimiento hasta en 25 % y susceptibilidad a pudrición de mazorca y daño de insectos en granos almacenados [38,39]. Muchas instituciones y personas en el mundo trabajaron para superar estas deficiencias. Cuando esto fue conseguido, el CIMMYT denominó a estos nuevos maíces de endospermo duro y alta calidad de proteína como QPM, por sus siglas en ingles de Quality Protein Maize [40].

Investigadores [40] indican que el mejoramiento del QPM debe incluir tres distintos sistemas genéticos. En principio, el alelo recesivo o_2 regula la síntesis de zeína. Las zeínas son las proteínas más abundantes en el endospermo del maíz y se caracterizan por su bajo contenido de lisina y triptófano. El alelo o_2 al estado homocigota produce una disminución significativa de zeína y un incremento de proteínas con mayor contenido de lisina y triptófano. El segundo sistema está relacionado con la presencia de genes modificadores de la textura del endospermo, lo que permite convertir el endospermo suave en endospermo duro, cristalino, sin perder los valores de lisina y triptófano. La identificación de estos granos cristalinos es relativamente sencilla con el uso de una caja translúcida, que permite discriminar las diferentes texturas del grano, desde opaco hasta translucido. El tercer sistema está relacionado con la presencia de genes modificadores de la cantidad de lisina y triptófano en el endospermo. Para el caso de lisina, el maíz normal tiene un promedio de 2 % y el QPM de 4 % (expresado en porcentaje del total de proteína); sin embargo, el rango de variación en maíces normales oscila entre 1.6 y 2.6, y en el QPM entre 2.7 y 4.5. Para el caso del triptófano, el maíz normal tiene un promedio de 0.4 % y el QPM de 0.8 % (expresado en porcentaje del total de proteína); sin embargo, el rango de variación en maíces normales oscila entre 0.2 y 0.5, y en el QPM entre 0.5 y 1.1. El contenido de lisina y triptófano está altamente correlacionado y solo uno de ellos podría ser necesario en los análisis de calidad proteica. En la práctica, se suele analizar el triptófano porque su determinación

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



es menos costosa. Estos genes modificadores de la cantidad de aminoácidos han sido mapeados en los cromosomas 3, 4 y 7 del maíz.

En el Perú se iniciaron las investigaciones sobre el uso de los maíces de alta calidad proteica en la sexta década del siglo pasado, tan pronto se conocieron las cualidades de estos tipos de maíz [41]. El mismo autor también menciona la introducción del gen o_2 en algunos compuestos raciales del Perú teniendo cuidado en mantener tanto la variabilidad genética como la calidad nutritiva. Al finalizar el año 1970 se introdujeron, del CIMMYT, los pooles andinos I, II y III, homocigotas para el gen o_2, que fueron cruzados con 24 compuestos raciales de la sierra. Según Borbor (1995), mencionado por [41], después de dos retrocruzas el fenotipo de las razas peruanas se recuperó rápidamente, el pool andino I fue el mejor donante para las razas de grano grande de la costa central y del sur de Perú; mientras que para las razas de la sierra norte fue el Pool II. En esta época también se recibieron del CIMMYT varias poblaciones segregantes para el gen o_2, entre ellas el Compuesto J, que luego de 10 ciclos de selección permitió formar la variedad Opaco Huascarán o PMV-580. Esta variedad se utilizó como fuente de resistencia de enfermedades foliares [41] y como forraje para la alimentación animal, principalmente en el sur del país [27].

Se reporta un estudio de la adaptación de cultivares de maíz de alta calidad proteica en Cajamarca [42], en el que se destaca al Compuesto I como cultivar adaptado a las condiciones de la sierra media a alta. Su uso ha sido principalmente como forraje para alimentación de vacunos.

Posteriormente, se describe la formación de variedades con el gen o_2 desarrolladas por el Programa Cooperativo de Investigaciones en Maíz (PCIM) de la UNALM: entre ellas la PMS-266, formada por líneas de la raza Perla, y la PMS-267, formada por líneas centroamericanas [27].

El mismo autor [27] evaluó híbridos normales y opacos en dos localidades de Perú en los años 1973 y 1974, entre los que observó entre 12 % y 16 % mayor rendimiento de los maíces normales. Cuando se evaluaron sintéticos amiláceos de alta calidad de proteína y variedades amiláceas locales en tres localidades de Perú, se observó que el rendimiento promedio de los sintéticos de alta calidad de proteína fue 5.1 t/ha comparado con 1.4 t/ha de los maíces amiláceos locales.

Otros autores [43] evaluaron el valor biológico del maíz opaco 2 en cancha y mote, y demostraron que los granos no perdían la calidad proteica cuando se tostaban o hervían para elaborar cancha o mote, respectivamente.

El año 2007, el INIA liberó el híbrido de alta calidad de proteína, INIA-611 Nutri Perú, con alto potencial de rendimiento, superior a las 10.0 t/ha con buena adaptación para las condiciones de la costa y la selva del país [44]. Este es un híbrido simple formado por 2 líneas homocigotas desarrolladas por el CIMMYT. Ha sido liberado en al menos 5 países de américa Latina y Asia, lo que es una indicación de su buena adaptación a diferentes ambientes. Los granos del híbrido son de color amarillo-naranja de muy buena aceptación por los agricultores y avicultores de Perú, ventaja que debería ser aprovechada.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



DESAFÍOS Y OPORTUNIDADES

El problema de la malnutrición e inseguridad alimentaria, no solo en el Perú sino en todo el mundo, es multifacético. En este sentido, se requieren estrategias que aborden eficazmente una enmarañada y confusa interacción de factores agronómicos, socioeconómicos, políticos, institucionales, psicológicos y cognitivos. Comprender estos factores es vital [3]. Los 24 millones de personas con hambre aguda que se sumaron al problema en 2023, reflejan esta interacción. Hay una seria crisis alimentaria y un deterioro marcado de la seguridad alimentaria que supera con creces los niveles registrados antes de la pandemia del COVID-19 [16].

En Perú, el impacto negativo de los factores adversos causados por El Niño se reflejó en la contracción de la economía en 2023 (BCRP, citado por [45]). La producción agrícola disminuyó en 4.1 %, la peor desde 1992 (IPE, febrero de 2024, citado por [45]). Se viene manifestando una leve recuperación luego de las repercusiones de la pandemia, pero los precios se han disparado sobre todo en los cereales, menestras y aceites [45].

Además del incremento de la población y el incremento de las necesidades de producción de alimentos, para el año 2050 se prevé que solo el 30 % de la población vivirá en el campo, mientras que el resto vivirá en las ciudades. Este cambio demográfico requiere una reorientación de los sistemas alimentarios para atender las nuevas poblaciones citadinas y erradicar el hambre oculta, la malnutrición y la inseguridad alimentaria [4].

Por otro lado, a nivel mundial no existen estimaciones globales o regionales que combinen las diferentes formas de desnutrición infantil, como retraso en el crecimiento y sobrepeso o retraso en el crecimiento y emaciación [15], y este es un desafío muy serio. Frente a este escenario sombrío, el avance en el conocimiento de las propiedades de la biodiversidad de cultivos alimenticios nos brinda la oportunidad de mejorar los sistemas alimentarios con dietas saludables y nutritivas, especialmente para las poblaciones vulnerables como las de zonas altoandinas.

En 2023, se cumplieron 20 años desde la introducción de la biofortificación para mejorar el valor nutricional de los cultivos básicos, mediante el fitomejoramiento selectivo [2], y no existen dudas sobre sus beneficios económicos y su influencia en la seguridad alimentaria y los medios de vida de los productores. No obstante, se debe trabajar en la aceptación por parte de los agricultores y consumidores, así como en el contexto sociocultural [11]. Una vez que se capitalice la adopción y/o aceptación es imperante el acceso a semillas de calidad, en forma oportuna, en cantidad suficiente y a un precio justo. El acceso a semillas de calidad es una barrera que, por años, enfrentan los agricultores de países en vías de desarrollo. Para vencer esta limitante es necesario fortalecer la capacitación, mostrar *in situ* la adaptación y ventajas de producir cultivos biofortificados y a la vez enlazar a los productores con el mercado en condiciones ventajosas.

En varios países de América Latina el estado cuenta con programas sociales que promueven la compra y consumo de alimentos para poblaciones en riesgo. Es posible comprar de manera directa a los agricultores los alimentos biofortificados

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



que producen para destinarlos a programas sociales. En Perú existen seis programas dirigidos a niños menores de cinco años. Con mayor presencia en la Encuesta Nacional de Niveles de Vida [46], aparecen en orden de importancia: Vaso de Leche, Desayunos Escolares, programas que le den papilla a menores como el Programa de Alimentación Complementaria de Focalización (PACFO), los WAWA WASI, el Programa de Alimentación y Nutrición a Familias en Alto Riesgo (PANFAR) y los comedores populares. Existe, por lo tanto, una ventana de comercialización que aún no se ha aprovechado en su totalidad.

RECOMENDACIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

Se necesita hacer más investigación antes de poder hacer recomendaciones específicas [7]. Como se mencionó, la biofortificación enfrenta varios desafíos, que van desde cuestiones técnicas en el proceso *per se*, hasta las limitaciones genéticas, la biodisponibilidad, y los obstáculos políticos y regulatorios para lograr su aceptación [11] y sostenibilidad, sin causar impactos negativos en general.

Frente a estos factores adversos existen oportunidades que deben ser tomadas como recomendaciones. Es necesario investigar para biofortificar cereales y menestras para proporcionar dietas equilibradas que reduzcan la desnutrición. En este sentido es necesario utilizar las nuevas alternativas de mejoramiento, como la edición genética, la sobreexpresión de genes y la transferencia de genes de parientes silvestres, para obtener cultivos con perfiles nutricionales óptimos [11].

El Estado debe pensar que la biofortificación puede ser una excelente alternativa para llegar a las poblaciones donde la suplementación y las actividades de fortificación convencional son difíciles de implementar. En este sentido, se debe ampliar la investigación en biofortificación, con hierro en arroz, frijoles, camote, yuca y leguminosas; con zinc en trigo, arroz, frijoles, camote y maíz; con provitamina A en papa, maíz y yuca; y con aminoácidos y proteínas en maíz y yuca.

CONCLUSIONES

En el Perú, existe una amplia base genética de maíz sustentada en la existencia de más de 50 razas, una de ellas es la raza Kcully que ha dado origen a variedades con alta concentración de antocianina. El MIDAGRI describe 10 variedades de maíz morado, seis son las más conocidas y cuatro variedades mejoradas.

La UNALM y el INIA vienen estudiando más ampliamente la adaptación de 5 variedades de maíz morado en 30 localidades de diferentes regiones del país. Los resultados preliminares de campo son muy prometedores y auspician un buen estudio de la interacción genotipo ambiente. Con la cuantificación de antocianinas de cada variedad en cada localidad se tendrá mayor información de la adaptación de las variedades a las diferentes condiciones ambientales del país y su variación en el contenido de antocianinas.

DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



En los últimos 20 años la producción de maíz morado en el Perú se ha cuadruplicado por el incremento de tres veces la superficie sembrada y por el aumento del 12 % en el rendimiento. El mayor consumo de maíz morado ha sido el factor determinante en las tendencias observadas.

La exportación del maíz morado se ha triplicado entre 2010 y 2020. Actualmente, se exportan 1242 toneladas por un valor de 1542 millones de dólares. Estados Unidos y la Unión Europea son los principales destinos y representan el 70 % de las exportaciones.

Existen variedades de libre polinización e híbridos promisorios de maíz biofortificado con Zn con alto potencial de rendimiento, tanto en la costa como en la sierra. Estos son superiores a las variedades e híbridos no biofortificados, ventaja que debe ser aprovechada por los consumidores a nivel nacional.

Se ha determinado que el híbrido experimental CLTHW16138 posee alto rendimiento (superior a 13.0 t/ha) y un contenido de Zn muy alto (44.5 ppm), por lo tanto, es un candidato para ser liberado si se ratifica este comportamiento en posteriores evaluaciones. Los híbridos con cantidades de Zn mayores a 37 ppm pueden servir como fuentes para la obtención de germoplasma con esta característica.

Los maíces biofortificados tienen más de 10 ppm de ProA comparado con 2 ppm de los normales. La investigación y promoción de maíz amarillo biofortificado con ProA puede ser una alternativa viable en el Perú y el mundo ya que las gallinas ponedoras que consuman este tipo de maíz producirían huevos con yemas con mayor contenido de ProA que beneficiaría a la población rural y urbana. El híbrido simple CLHP0003/CLHP0005&CML304 tiene un potencial de rendimiento superior a 14.0 t/ha, superior al del mejor híbrido simple no biofortificado.

El año 2007, INIA liberó el híbrido INIA-611 con alta calidad de proteína y alto potencial de rendimiento, superior a las 10.0 t/ha [44]. Este es un híbrido simple formado por dos líneas homocigotas desarrolladas por el CIMMYT y ha sido liberado en al menos cinco países de América Latina y Asia lo que indica su adaptación en diferentes ambientes. Los granos del híbrido son de color amarillo-naranja de muy buena aceptación por los agricultores y avicultores de Perú.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Luis Narro León y Alexander Chávez Cabrera concibieron las investigaciones. Luis Narro León desarrolló la metodología; Alexander Chávez Cabrera, Kryss Vargas Gutiérrez y Camilo Velásquez Leveaú trabajaron en la adquisición de fondos y la provisión de recursos. Luis Narro León, Alexander Chávez Cabrera, Peter Piña Díaz, Fernando Escobal Valencia, Alicia Medina Hoyos, Teodoro Narro León, Roberto Alvarado Rodríguez, Mercedes Escalante Vega, Gilberto García Pando, Pedro Carrillo Zavala, Raihil Rengifo Sánchez, Elizabeth Ricse Belen, Demetrio Flores Mendoza, Willian Huamanchay Rodríguez y Ronal Otiniano Villanueva realizaron el trabajo de campo. Luis Narro León redactó el manuscrito y, junto con Alexander Chávez Cabrera revisaron críticamente el contenido intelectual del manuscrito y editaron el documento.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



AGRADECIMIENTOS

Los experimentos de maíz morado con alto contenido de antocianinas y de maíz biofortificado con zinc y maíz biofortificado con ProA, fueron financiados por el Proyecto de Inversión 2361771: “Mejoramiento de la disponibilidad, acceso y uso de semillas de calidad de: papa, maíz amiláceo, leguminosas de grano y cereales, en las regiones de Junín, Ayacucho, Cusco y Puno. 4 departamentos”, del Instituto Nacional de Innovación Agraria de Perú. Los experimentos de maíz biofortificado con zinc y maíz biofortificado con ProA, sembrados en la localidad de Chagualito, fueron financiados por la Asociación Pataz.

Los autores agradecen al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) por facilitar la semilla experimental de maíces biofortificados para su evaluación en diferentes localidades del Perú y a la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) por el asesoramiento y ejecución de ensayos en el ámbito de la Universidad. Agradecen también la contribución de Gabriela Eliza Quevedo Rabanal, por haber proporcionado los datos estadísticos relevantes e información necesaria extraída de la SUNAT para elaborar este documento. De igual manera, agradecen a la Red Latinoamericana de Maíz, al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) y al proyecto TechMaíz por la difusión de tecnologías para el cultivo de maíz y por haber gestionado la elaboración y publicación de este artículo.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que esta investigación fue conducida en la ausencia de relaciones comerciales o financieras que pudieran constituir un potencial conflicto de interés.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277



REFERENCIAS

[1] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2018). *Expertos mundiales en maíz hablan de la biofortificación para la nutrición y la salud.* CIMMYT. https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/expertos-mundiales-en-maiz-hablan-de-la-biofortificacion-para-la-nutricion-y-la-salud/

[2] Philanthropy Cartier. (2023). *20 Years of Biofortification*. Philanthropy Cartier. https://www.cartierphilanthropy.org/news/20-years-of-biofortification

[3] Samuel, L., de Barcellos, M. D., Watabaji, M. D. y De Steur, H. (2024). Factors affecting farmers' acceptance and adoption of biofortified crops: A systematic review. *Outlook on Agriculture*, *53*(1), 15-29. doi: https://doi.org/10.1177/00307270231212924

[4] Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2023). *The State of Food Security and Nutrition 2023. Urbanization, agrifood systems, transformation and healthy diets across the rural urban continuum*. UNICEF. https://data.unicef.org/resources/sofi-2023/

[5] Organización para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Hambre e Inseguridad Alimentaria*. FAO. https://www.fao.org/hunger/es/

[6] HarvestPlus. (2024). *Better Crops, Better Nutrition.* HarvestPlus. https://www.harvestplus.org/

[7] World Health Organization. (2023). *Biofortification of staple crops*. World Health Organization. https://www.who.int/tools/elena/interventions/biofortification

[8] Talsma, E. F. y Pachón H. (2017). *Biofortification of crops with minerals and vitamins.* World Health Organization. https://www.who.int/tools/elena/bbc/biofortification#:~:text=Biofortification%20is%20the%20process%20by,importantly%20to%20farmers%20(1).

[9] World Health Organization. (2023). *Multiple micronutrient powders for point-of-use fortification of foods consumed by children 6–23 months of age*. World Health Organization. https://www.who.int/tools/elena/interventions/micronutrientpowder-infants

[10] Huey, S. L., Krisher, J. T., Bhargava, A., Friesen, V. M., Konieczynski, E. M., Mbuya, M. N. N., Mehta, N. H., Monterrosa, E., Nyangaresi, A. M. y Mehta, S. (2022). Review of the Impact Pathways of Biofortified Foods and Food Products. *Nutrients*, *14*(6), 1200. doi: https://doi.org/10.3390/nu14061200

[11] Ashoka P., Sangeeta, Spandana, B., Saikanth, D. R. K., Kesarwani, A., Nain, M., Pandey, S. K., Singh, B. V. y Maurya, C. L. (2023). Bio-fortification and Its Impact on Global Health. *Journal of Experimental Agriculture International*, *45*(10), 106–115. doi: https://doi.org/10.9734/jeai/2023/v45i102203

[12] Sandhu, R., Chaudhary, N., Shams, R., Singh, K. y Pandey, V.K. (2023). A critical review on integrating bio fortification in crops for sustainable agricultural development and nutritional security. *Journal of Agriculture and Food Research*, 14. doi: https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100830.

[13] Organización para la Alimentación y la Agricultura. (2022). *Hambre e Inseguridad Alimentaria*. FAO. https://www.fao.org/hunger/es/

[14] Baral, A. (2023). *HarvestPlus: Twenty years of enriching diets with biofortification*. International Food Policy Research Institute. https://www.ifpri.org/blog/harvestplus-twenty-years-enriching-diets-biofortification

[15] United Nations Children's Fund, World Health Organization, International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. (2023). *Levels and trends in child malnutrition*. UNICEF, WHO, World Bank Group. https://www.who.int/publications/i/item/9789240073791

[16] World Bank. (2024). *Food Security Update 2024*. World Bank. https://thedocs.worldbank.org/en/doc/40ebbf38f5a6b68bfc11e5273e1405d4-0090012022/related/Food-Security-Update-CV-April-25-2024.pdf

[17] Verano, P. (2024). El Perú registra su peor situación nutricional de los últimos 10 años, según el Índice Global del Hambre 2023. *Radio Programas del Perú.* https://rpp.pe/peru/actualidad/indice-global-del-hambre-2023-peru-registra-su-peor-situacion-nutricional-de-los-ultimos-10-anos-noticia-1518461

[18] Maqbool Muhammad, A., Beshir Issa, A. y Khokhar Ehtisham, S. (2021). Quality protein maize (QPM): Importance, genetics, timeline of different events, breeding strategies and varietal adoption. *Plant Breeding*, *140*, 375–399. doi: https://doi.org/10.1111/pbr.12923



[19] Tian, X. Z. Paengkoum, P., Paengkoum, S., Chumpawadee, S., Ban, C. y Thongpea, S. (2019). Short communication: Purple corn (*Zea mays* L.) stover silage with abundant anthocyanins transferring anthocyanin composition to the milk and increasing antioxidant status of lactating dairy goats. *Journal of Dairy Science*, *102*(1), 413–418. doi: https://doi.org/10.3168/jds.2018-15423

[20] Tian, X., Xin, H., Paengkoum, P., Paengkoum, S., Ban, C. y Sorasak, T. (2019). Effects of anthocyanin-rich purple corn (*Zea mays* L.) stover silage on nutrient utilization, rumen fermentation, plasma antioxidant capacity, and mammary gland gene expression in dairy goats1. *Journal of Animal Science*, *97*(3), 1384–1397. doi: https://doi.org/10.1093/jas/sky477

[21] Monroy, Y. M., Rodrigues, R. A. F., Sartoratto, A. y Cabral, F. A. (2020). Purple corn (*Zea mays* L.) pericarp hydroalcoholic extracts obtained by conventional processes at atmospheric pressure and by processes at high pressure. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 37: 237-248. doi: https://doi.org/10.1007/s43153-020-00009-x

[22] Moreno-Loaiza, O. y Paz-Aliaga, A. (2010). Efecto vasodilatador mediado por óxido nítrico del extracto hidroalcohólico de *Zea mays* L. (maíz morado) en anillos aórticos de rata. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, *27*(4),527-531. doi: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342010000400006&lng=es&tlng=es

[23] Heras, I., Alvis, A. y Arrazola, G. (2013). Optimización del Proceso de Extracción de Antocianinas y Evaluación de la Capacidad Antioxidante de Berenjena (*Solanum melongena* L.). *Información tecnológica*, *24*(5), 93-102. doi: https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000500011

[24] Medina-Hoyos, A., Narro-León, L. A. y Chávez-Cabrera, A. (2020). Cultivo de maíz morado (*Zea mays* L.) en zona altoandina de Perú: Adaptación e identificación de cultivares de alto rendimiento y contenido de antocianina. *Scientia Agropecuaria*, *11*(3), 291-299. doi: https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.01

[25] Grobman Tversqui, A. (2004). Origen del Maíz. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigación en Maíz* (pp 537). Universidad Nacional Agraria La Molina.

[26] Grobman Tversqui, A., Salhuana, W., Sevilla Panizo, R. y Mangelsdorf, P. C. (1961). *Races of Maize in Perú. Their origins, evolution and classification*. National Research Council.

[27] Manrique Chávez, A. (1997). *El maíz en el Perú.* Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC).

[28] Ministerio del Ambiente. (2018). *Línea de base de la diversidad genética del maíz peruano con fines de bioseguridad*. Ministerio del Ambiente.

[29] Garzón, G. A. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: Revisión. *Acta Biológica Colombiana*, *13*(3), 27-36. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2008000300002&lng=en&tlng=es.

[30] Guillén-Sánchez, J., Mori-Arismendi, S. y Paucar-Menacho, L.M. (2014). Características y propiedades funcionales del maíz morado (*Zea mays* L.) var. subnigroviolaceo. *Scientia Agropecuaria*, *5*(4), 211-217. doi: https://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2014.04.05

[31] Espinosa-Trujillo, E. (2012). *Bioquímica y Genética de las Antocianinas del Grano de Maíz*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (INIFAP).

[32] Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2021). *El maíz morado peruano: Un producto con alto contenido de antocianina, poderoso antioxidante natural*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego.

[33] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2014). Maíz INIA 601: Variedad mejorada de maíz morado para la sierra norte del Perú. Instituto Nacional de Innovación Agraria. http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/65

[34] Garcia-Oliveira, A.L., Chander, S., Ortiz, R., Menkir, A. y Gedil, M. (2018). Genetic Basis and Breeding Perspectives of Grain Iron and Zinc Enrichment in Cereals. *Front. Plant Sci*., *9*, 937. https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.00937

[35] Bouis, H. E. y Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, *12*, 49-58. doi: 10.1016/j.gfs.2017.01.009

[36] Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (2015). *Nuevas tecnologías para incrementar la rentabilidad del sistema café-maíz*. CIMMYT. https://www.cimmyt.org/es/uncategorized/nuevas-tecnologias-para-incrementar-la-rentabilidad-del-sistema-cafe-maiz/



[37] Mertz E.T., Bates L.S. y Nelson O.E. (1964). Mutant gene that changes protein composition and increases lysine content of maize endosperm. *Science, 145*, 279-280. https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.145.3629.279

[38] Vasal S.K. (2000a). The Quality Protein Maize Story. *Food and Nutrition Bulletin*, *21*(4), 445-450. doi:10.1177/156482650002100420

[39] Vasal, S.K. (2000b). High Quality Protein Corn. En Hallauer, A.R. (Ed). *Specialty Corns* (pp 85-130). CRC Press.

[40] Krivanek, A., De Groote, H., Gunaratna N.S., Diallo A. O. y Friese D. (2007). Breeding and disseminating quality protein maize (QPM) for Africa. *African Journal of Biotechnology, 6*(4), 312-324. http://www.academicjournals.org/AJB

[41] Sevilla, R. (2003). Mejoramiento de maíz en la sierra del Perú. En *Cincuenta años del Programa Cooperativo de Investigación en Maíz* (pp 537). Universidad Nacional Agraria La Molina.

[42] Narro, L. A. (1977). *Adaptación de cultivares de maíz de alta calidad proteica en Cajamarca - Informe Técnico N° 94*. INIACRIAN.

[43] Aguilar, T., Manrique A. y Rojas V. (1974). *Valor biológico del maíz opaco-2 en cancha y mote*. Archivos Latinoamericanos de Nutrición.

[44] Instituto Nacional de Innovación Agraria. (2007). *Maíz Amarillo Duro INIA 611 Nutri-Perú híbrido simple de alta calidad proteica*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. https://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/625

[45] Food Security Information Network. (2024). Latin America and The Caribbean. *2024 Global Report on Food Crises*. FSIN. https://www.fsinplatform.org/sites/default/files/resources/files/GRFC2024-regional-lac-CoC.pdf

[46] Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2022). *Perú - Encuesta Nacional de Hogares sobre Condiciones de Vida y Pobreza 2021*. INEI. http://webinei.inei.gob.pe/anda_inei/index.php/catalog/745

[47] Steel, R.G.D. y Torrie, J.H. 1985. *Bioestadística: Principios y Procedimientos*. McGraw-Hill Latinoamérica.

 DOI: https://doi.org/10.18272/aci.v16i2.3277